

50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau
von Makro bis Nano /
Mechanical Engineering
from Macro to Nano**

Proceedings

Fakultät für Maschinenbau /
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Impressum

- Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
- Redaktion: Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten
Andrea Schneider
- Fakultät für Maschinenbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz,
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß,
Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges,
Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer,
Dipl.-Ing. Silke Stauche
- Redaktionsschluss: 31. August 2005
(CD-Rom-Ausgabe)
- Technische Realisierung: Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau
(CD-Rom-Ausgabe) Dipl.-Ing. Christian Weigel
Dipl.-Ing. Helge Drumm
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
- Technische Realisierung: Universitätsbibliothek Ilmenau
(Online-Ausgabe) [ilmedia](#)
Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau
- Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.
Werner-von-Siemens-Str. 16
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe): 3-932633-98-9 (978-3-932633-98-0)
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-932633-99-7 (978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:
<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

T. Köder / W. Schinköthe

Untersuchungen zur Zuverlässigkeit und Lebensdauer von DC-Kleinstmotoren und Positioniersystemen

ABSTRAKT

Die Zuverlässigkeit von Produkten ist eine wesentliche Produkteigenschaft und bei vielen Erzeugnissen auch ein wesentliches Kaufkriterium. Anspruchsvolle technische Systeme besitzen jedoch eine sehr hohe Komplexität. Das bezieht sich auf die Vielzahl von Komponenten und ihre Funktionen sowie auch auf die Anzahl der unterschiedlichen Fachgebiete, z. B. Mechanik, Elektronik, Sensorik und Software. Zuverlässigkeitsprognosen, -berechnungen und -simulationen erfolgten bisher vorwiegend an Hand von Daten experimenteller Untersuchungen an Prototypen und damit in sehr späten Entwicklungsphasen. Ziel einer an der Universität Stuttgart gegründeten Forschergruppe ist es, Methoden zur Bestimmung der Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen zu entwickeln. In einem der Teilprojekte werden dabei insbesondere feinwerktechnische Antriebe und Positioniersysteme untersucht.

ZUVERLÄSSIGKEITSBETRACHTUNGEN AM BEISPIEL VON GLEICHSTROMANTRIEBEN - ERGEBNISSE VON LITERATURERCHERCHEN UND INDUSTRIEBEFRAGUNGEN

Um eine Aussage bezüglich des ausgewählten Demonstrators Gleichstromkleinantrieb zu erhalten, wurde eine Katalogrecherche zu bürstenbehafteten und elektronisch kommutierten Gleichstrommotoren durchgeführt. Ausgewählt wurden zunächst alle feinwerktechnische Motoren dieser Motorbauform, wodurch Motoren mit einem sehr breiten Leistungs- und Anwendungsspektrum Berücksichtigung fanden. Insgesamt wurden 53 Hersteller von bürstenbehafteten DC-Motoren und 35 Anbieter von EC-Motoren abgefragt. Zunächst standen nur die reinen Katalogdaten im Mittelpunkt, und wurden nach Kriterien zu den Lebensdauerangaben ausgewertet (Abb. 1).

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen deutlich eine sehr große Unsicherheit bzw. eine unbefriedigende Situation im Umgang mit Zuverlässigkeitsangaben solcher Systeme. In vielen Fällen wird im Katalog gar nicht auf diese Problematik eingegangen, sondern eine Nachfrage von Seiten des Kunden abgewartet. In anderen Fällen werden Angaben gemacht, die nur besagen, dass das Produkt eine lange Lebensdauer hat, ohne Angabe von weiteren Werten oder Bedingungen dazu. Sind schließlich Zahlenwerte angegeben, handelt es sich zumeist um Zeitspannen, die einen sehr großen Bereich und damit auch mehrere Typen und Anwendungsgebiete abdecken sollen. Angaben zum Bezug der Werte sind bei DC-Motoren in den Katalogen nicht enthalten, so dass unklar bleibt,

ob es sich z. B. um eine ausfallfreie Zeit t_0 oder eine B_{10} -Lebensdauer handelt. Alles in allem sind die Angaben damit nur wenig aussagekräftig und in vielen Fällen nur als grober Richtwert für mehrere Motortypen zu sehen. Liegt beispielsweise eine Katalogangabe von 1000h als Lebensdauer für einen Motor vor, bedeutet das im Fall einer Angabe als ausfallfreie Zeit, dass **kein** Motor vor diesem Zeitpunkt ausfällt. Bezieht sich die Angabe auf einen B_{10} -Wert, ist damit zu rechnen, dass innerhalb der ersten tausend Stunden 10% der Motoren ausfallen. Ist damit gar die mittlere Lebensdauer bzw. der MTBF-Wert gemeint, wie bei elektronischen Bauelementen üblich, liegt die Ausfallwahrscheinlichkeit bei typischen Weibullverteilungen zu diesem Zeitpunkt sogar im Bereich von 45% bis 65%. Anhand dieses Beispiels sieht man sehr anschaulich, wie wenig Aussagekraft die Katalogdaten für den Kunden besitzen, wenn die Bezugsgröße nicht mit angegeben wird [6].

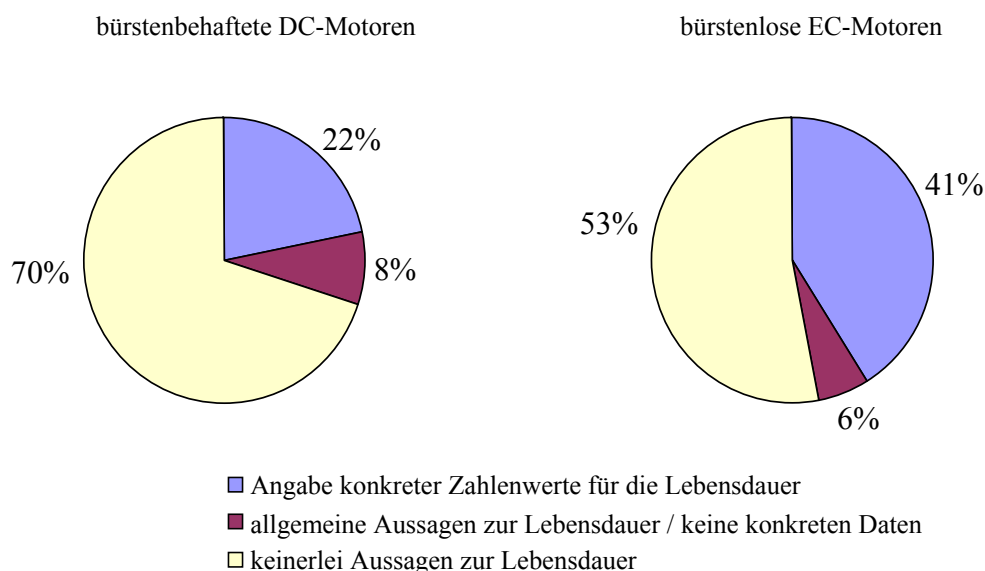


Abb. 1: Angaben zur Produktlebensdauer in Herstellerkatalogen

Bei EC-Motoren hängt die erreichbare Lebensdauer überwiegend von der Lagerbauart ab. Einige Anbieter beziehen sich auf die verbauten Kugellager und geben daher, ohne dies deutlich anzusprechen, eine B_{10} -Lebensdauer des Gesamtsystems an, die aber letzten Endes nur das Ausfallverhalten der Lagerbaugruppe widerspiegelt. Ansonsten werden auch hier zum großen Teil Bereiche angegeben bzw. einheitliche Mindestlebensdauern von 20000h, die als ausfallfreie Zeiten interpretiert werden könnten.

Ergänzend wurden 16 (DC) bzw. 14 (EC) Hersteller speziell von Kleinantrieben im unteren Leistungsbereich aus dem ersten Teil der Umfrage ausgewählt und zusätzlich telefonisch zur Art der Lebensdauerangaben ihrer Produkte befragt. Dabei wurden grundsätzlich Zahlenwerte genannt, der Bezug konnte dabei jedoch nicht immer geklärt werden (Abb. 2). Bei Betrachtung der Ergebnisse

muss berücksichtigt werden, dass die Gesprächspartner aus sehr unterschiedlichen Bereichen kommen und vom Vertrieb über die technische Beratung, dem Versuch bis hin zur Entwicklungsabteilung reichen. Daher ist die Aussagekraft der Antworten teilweise schwer einzuschätzen.

Überraschenderweise definieren die meisten Hersteller ihre Angaben als ausfallfreie Zeiten. Dieser Wert ist zwar für den Kunden optimal, bedeutet jedoch für den Hersteller, dass er bei einer solchen konkreten Zusage einen sehr großen Sicherheitsfaktor mit einbeziehen muss. Vor allem für die Aussagen bei EC-Motoren verwundert es sehr, dass nicht grundsätzlich die B₁₀-Lebensdauern angegeben wird, da sich alle Hersteller darin einig sind, dass nur die Lager als Ausfallursache in Frage kommen und somit eine Übernahme des gängigen Lagerkennwertes sinnvoll erscheint.

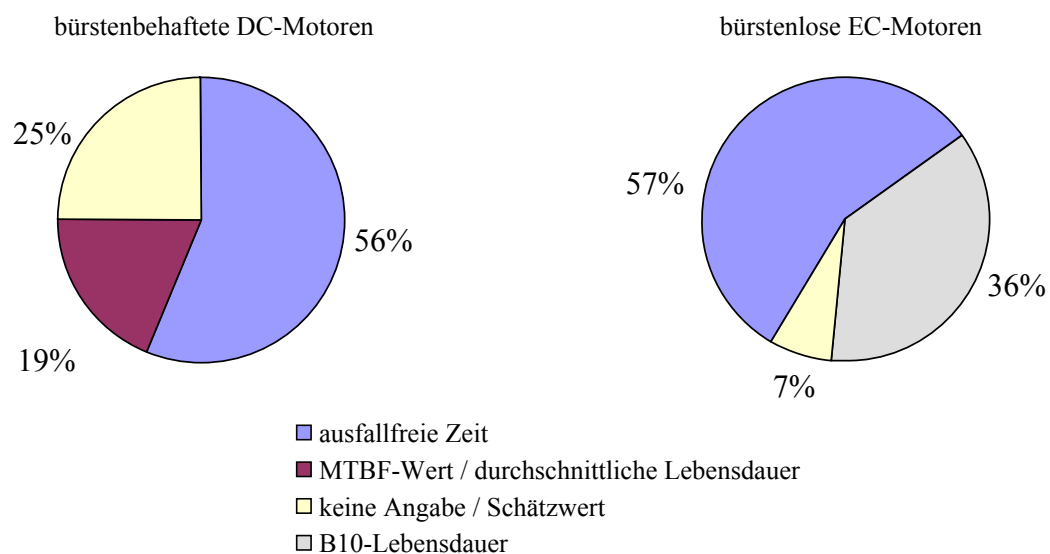


Abb. 2: Bezug der Lebensdauerangaben

Bei Lebensdaueraussagen zu einem bestimmten Motortyp wird in aller Regel so verfahren, dass die Hersteller kundenspezifische Versuche durchführen, bei denen die exakten späteren Einsatzbedingungen nachvollzogen werden und somit nur für diese eine konkrete Anwendung eine Aussage getroffen wird.

Sofern Methoden und Ausfallverhalten für einzelne Komponenten, wie z.B. Elektronikbauteile oder bestimmte mechanische Baugruppen, vorhanden sind, werden diese auch genutzt. Gerade aber bei den bürstenbehafteten Motoren gibt es bisher keine geeignete Beschreibungsform für das Ausfallverhalten des elektromechanischen Subsystems, so dass Versuche weiterhin unumgänglich sind. Nicht zuletzt wegen dem stark zunehmenden Interesse an der Zuverlässigkeitstechnik und der steigenden Nachfrage nach Angaben von der Kundenseite besteht hier aber ein akuter Handlungsbedarf zur Verbesserung der analytischen Lebensdauerbestimmung für Gesamtsysteme, um die Produktentwicklung zu beschleunigen. Einzelne Firmen sind bereits auf diesem Gebiet tätig geworden und

widmen sich dieser Problematik. Allerdings sind diese Daten auf Grund der hohen Produktvielfalt der einzelnen Hersteller meist sehr unvollständig. Da es sich zudem um sehr sensible Daten handelt, ist nahezu keine Veröffentlichung von Ergebnissen erhältlich. Ausnahmen sind [1]-[4].

Die komplette Recherche hat insgesamt gezeigt, dass bisher durchgeführte Untersuchungen im Bereich von Elektromotoren sich hauptsächlich auf Antriebe mit Graphitbürsten beziehen und derzeit keine allgemeingültigen Modelle oder Berechnungsmöglichkeiten zur Zuverlässigkeit dieser Systeme vorhanden sind. Das Interesse von Industrieseite an der Beschreibung des Ausfallverhaltens ist sehr groß und es werden auch teilweise eigene Untersuchungen in den Betrieben durchgeführt, wobei die Daten nicht zugänglich sind.

Möchte man langfristig das Ziel erreichen, bereits im Entwurfsstadium und damit in sehr frühen Produktentwicklungsphasen belastbare Aussagen zur späteren Lebensdauer machen zu können, sind Erkenntnisse über das Ausfallverhalten und zur Einschränkung der vorhandenen Unsicherheiten unabdingbar.

AUFBAU UND BESCHREIBUNG DER PRÜFSTÄNDE

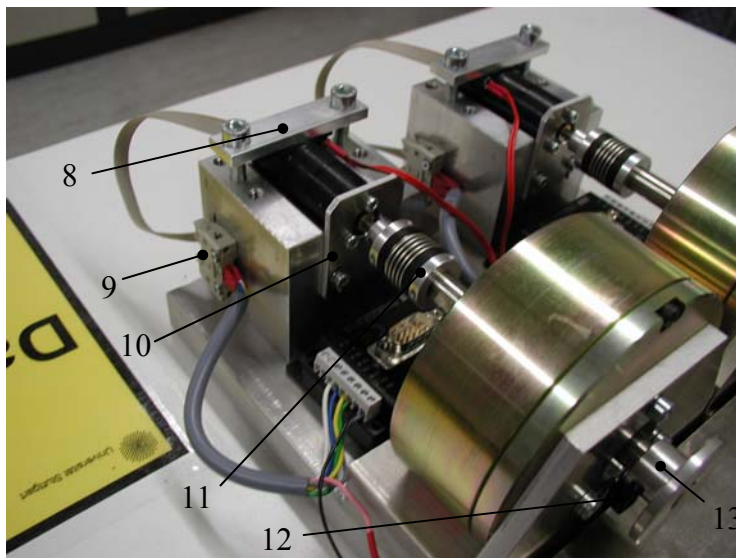
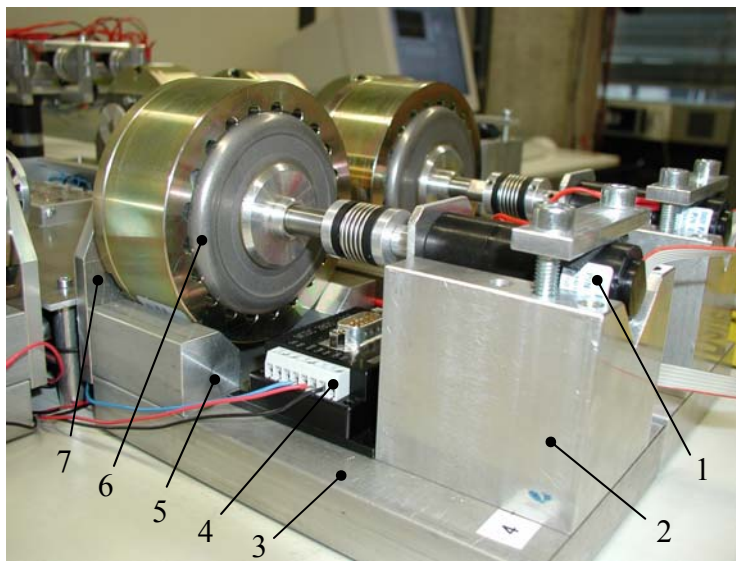
Aus diesem Grund wurden für eigene experimentelle Untersuchungen am Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart (IKFF) zwei Dauerversuchsstände aufgebaut. Die beiden Versuchstände (Abb. 3) sind in sich jeweils wiederum zweigeteilt. Der Hauptteil beschränkt sich auf reine Komponenten-Prüfplätze (zunächst für die elektromechanische Komponente, den Elektromotor) und besitzt einen Umfang von $2 \times 32 = 64$ Prüfplätzen. Zur Komplettierung der Versuchsergebnisse stehen weitere $2 \times 8 = 16$ Plätze für Systemuntersuchungen an kompletten Antriebssystemen bestehend aus Motor, Getriebe, Encoder und Ansteuerelektronik zur Verfügung.

Die Motoren werden dabei in einer Prismenschiene aufgenommen und liegen somit automatisch in einer sicheren Auflage. Das Spannen über den Umfang ist dabei unproblematisch, da die Motoren ein Metallgehäuse besitzen und die ohnehin geringen Belastungen gefahrlos aufnehmen können. Durch diese Anbindung wird eine Wärmeableitung gewährleistet, die mit der Aufnahme über den Motorflansch vergleichbar ist. Da die Versuche in einem unkritischen Temperaturbereich durchgeführt werden, kann der verbleibende Unterschied jedoch vernachlässigt werden.



Abb. 3: Dauerlaufprüfstand am IKFF

Die Belastung der Motoren erfolgt über Wirbelstrombremsen, bei Motor-Getriebe-Kombinationen über käufliche Hysteresebremsen (Abb. 4). Die selbst konzipierten Wirbelstrombremsen sind aus Rundmagneten aufgebaut, die mit abwechselnder Polarisierung kreisförmig auf dem Rückschluss angeordnet sind. Deren rotationssymmetrischer Aufbau verhindert einen einseitigen Kraftangriff an der Motorwelle. Durch den gewählten Aufbau ist keine mechanische Verbindung zwischen Motor und Wirbelstrombremse notwendig, so dass Querkräfte durch Fluchtungsfehler ausgeschlossen sind. Als Gegenstück dient eine Scheibe aus Aluminium, die direkt auf der Motorwelle befestigt wird und gleichzeitig zur Drehzahlerfassung genutzt wird. Die Nabe wird mit zwei gegenüberliegenden Stiftschrauben fixiert, um eine Unwucht zu vermeiden. Dieser Gesamtaufbau gewährleistet, dass alle Motoren nahezu identische Prüfbedingungen im Rahmen der Herstellerspezifikationen haben. Während der Versuche werden permanent der Kommutierungsstrom, die Drehzahl und die Temperatur am Motorgehäuse erfasst und überwacht. Somit ist gewährleistet, dass alle relevanten Daten, die zur Beschreibung der Systeme nötig sind, vorliegen. Die gesamte Prüfstandssteuerung und Datenauswertung erfolgt softwaremäßig über eine selbst programmierte Oberfläche in LabView. Um möglichst konstante Randbedingungen zu erhalten, finden die Versuche in einem separaten, klimatisierten Raum statt. Ein Betrieb rund um die Uhr nutzt die Einrichtungen optimal aus.



Legende:

- 1 Prüfling
- 2 Motorblock
- 3 Grundplatte
- 4 Ansteuerung
- 5 Bremsbock
- 6 Hysteresebremse
- 7 Rückwand
- 8 Motorspanner
- 9 Steckverbinder
- 10 Verdrehsicherung
- 11 Metallbalgkupplung
- 12 Lichtschranke
- 13 Drehzahlscheibe

Abb. 4: Aufbau des Systemprüfplatzes

VERSUCHSPLANUNG

In der ersten Projektphase wurden ausschließlich Versuche mit edelmetallkommutierten Antrieben durchgeführt. Das Verhalten graphitkommutierten Motoren ist besser erforscht, so dass auf vorhandene Ergebnisse zurückgegriffen werden kann. Ähnliches gilt auch für EC-Motoren, da sich hier ebenfalls basierend auf einer ausgiebiger Recherche gezeigt hat, dass lediglich die Lager lebensdauerbestimmend sind [1]. Parallel zur den Versuchen mit den elektromechanischen Komponenten werden Gesamtsystemversuche durchgeführt.

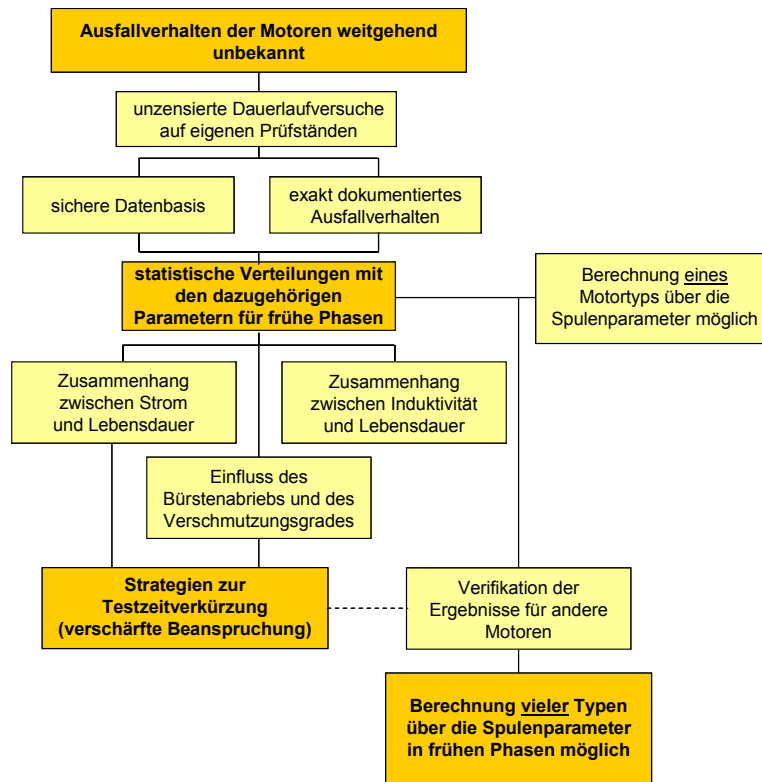


Abb. 5: Verschiedene Zielsetzungen der Dauerversuche mit Motoren

Insgesamt besteht die Zielsetzung darin, möglichst schnell zuverlässige Daten zu gewinnen, gegebenenfalls Zusammenhänge zu bestimmten Motorparametern zu ermitteln, diese einerseits für Strategien zur Testzeitverkürzung zu nutzen und letztendlich dann diese Daten und Erkenntnisse in sehr frühe Phasen einfließen zu lassen. Neben dem Ausfallverhalten und den Daten dazu wäre es auch von hohem Interesse, beispielsweise aus Entscheidungen zu Motor- oder Spulenparametern sofort eine Aussage über die Zuverlässigkeit verschiedener Konzepte im Vergleich treffen zu können (Abb.5).

Der Stichprobenumfang einer Testreihe besteht dabei immer aus 16 Motoren pro Spannungs-klasse die bei 5 verschiedenen Belastungshöhen im kontinuierlichen Dauerbetrieb getestet werden [5]. Die Ergebnisse sollen dabei neben statistischen Verteilungen und Daten zum Ausfallverhalten auch einen möglichen Zusammenhang zwischen Kommutierungsstrom und Verschleiß analysieren und den Einfluss der Auslegung auf die Lebensdauer aufzeigen, wobei stellvertretend dafür der Parameter Induktivität gewertet wird.

Bei den Systemversuchen werden identische Systeme, allerdings mit 5 verschiedenen Getriebeübersetzungen getestet.

AUSWERTUNG ERSTER VERSUCHSERGEBNISSE

Die Auswertung der Versuchsreihen soll hier beispielhaft aufgezeigt werden. Die erste abgeschlossene Versuchsreihe ermöglichte beispielsweise eine erste Abschätzung der Verteilungsfunktion, mit der sich das Ausfallverhalten beschreiben lässt. Dabei wurde vorher sichergestellt, dass allen betrachteten Ausfällen dieselbe Ausfallursache zu Grunde liegt.

Zuerst wurde nach der klassischen Methode vorgegangen und die empirische Dichtefunktion ermittelt. Zu diesem Zweck wurden die Daten in Klassen eingeteilt und die dazugehörige absolute Häufigkeit aufgetragen (Abb. 6). Zeichnet man durch die Klassenmitte die entsprechenden Verbindungsgeraden erhält man die empirische Dichtefunktion $f^*(t)$. Addiert man die Einzelwerte und trägt die dazugehörigen Summenhäufigkeiten ein, ergibt sich die empirische Ausfallwahrscheinlichkeit $F^*(t)$.

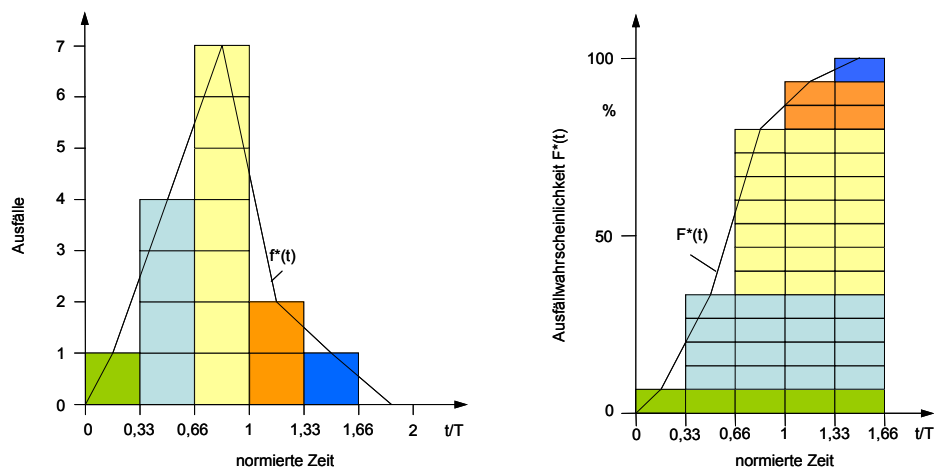


Abb. 6: Empirische Dichtefunktion und empirische Ausfallwahrscheinlichkeit

Durch den derzeit noch geringen Stichprobenumfang sind die Auswertungen dazu allerdings noch mit höheren Unsicherheiten behaftet. Der Verlauf der Dichtefunktion deutet auf eine Weibullverteilung, deshalb wurde eine Auswertung mit einem Weibullnetz vorgenommen (Abb. 7).

Die eingezeichneten hellen, im Farbdruck roten Messwerte liegen ungefähr auf einer Gerade, so dass zunächst für dieses Beispiel eine zweiparametrische Weibull-Verteilung angenommen wird. Bei weiteren Versuchsreihen liegt oftmals auch ein Ausfallverhalten gemäß einer dreiparametrischen Weibull-Verteilung vor. Der dazugehörige 90%-Vertrauensbereich ist durch die dunklen, im Farbdruck blauen Punkte angedeutet. Mittels einer Ausgleichsgerade können die Parameter b und T der Verteilung bestimmt werden. Demnach kann das Ausfallverhalten der ersten Testserie mit der folgenden Verteilungsfunktion beschrieben werden:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^{2,2}} \quad (1)$$

Im Ergebnis bedeutet dies das Fehlen einer ausfallfreien Zeit. Die charakteristische Lebensdauer T , bei der 63,2% aller Motoren bereits ausgefallen sind, ist aus Datenschutzgründen normiert dargestellt und wird damit zu 1.

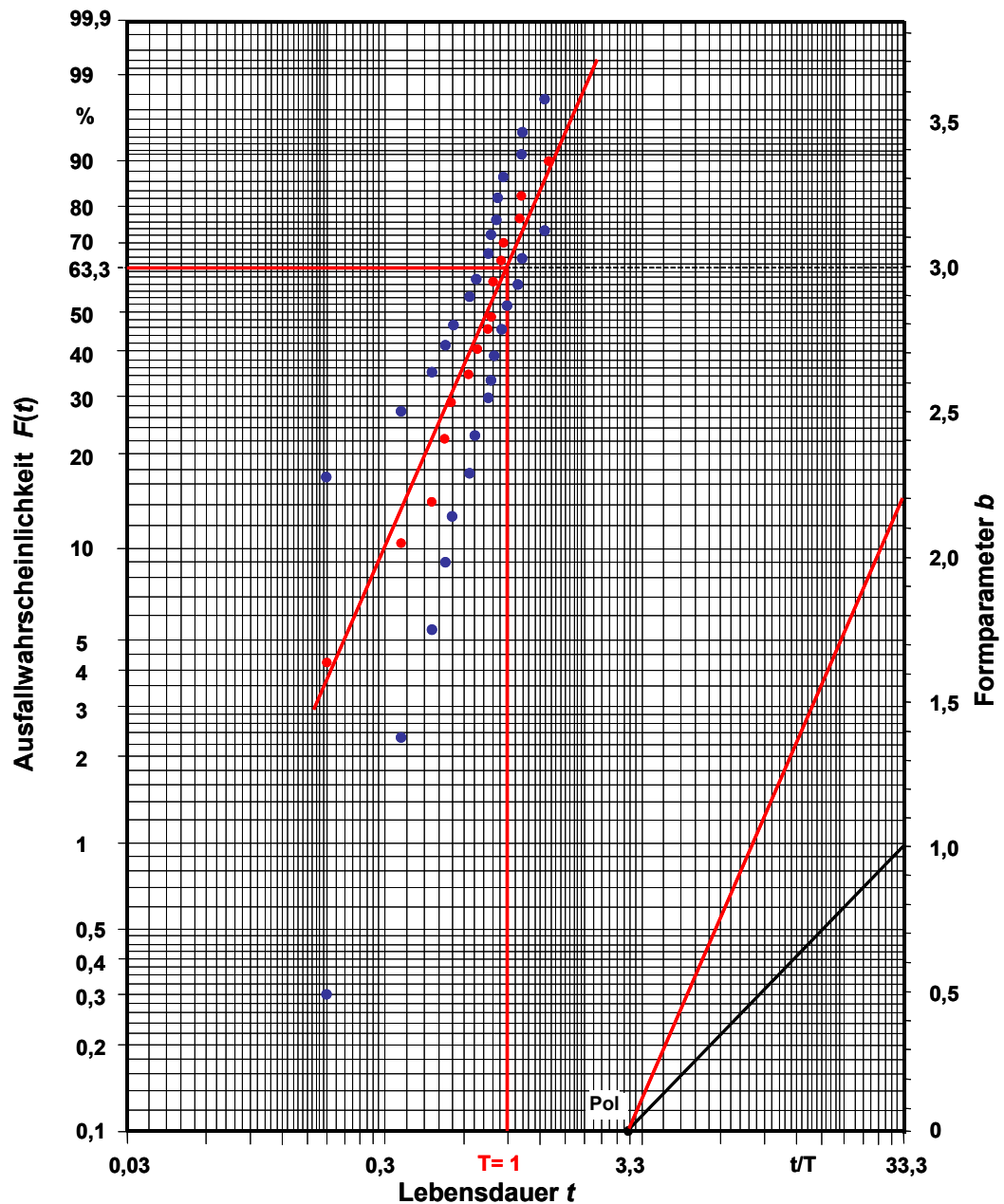


Abb. 7: Auswertung mit Hilfe des Weibullnetzes

Bei der Auswertung weiterer Reihen wurde ebenfalls das Weibullpapier eingesetzt. Grundsätzlich muss jede Versuchsreihe neu daraufhin untersucht werden, welche Verteilungsfunktion sich am besten zur Beschreibung des Ausfallverhaltens eignet.

Ziel ist es natürlich auch hier, nicht nur für einen einzelnen Versuch die Werte zu ermitteln. Daher wurde mittlerweile anhand der ersten kompletten Versuchsreihe (identischer Motortyp bei unterschiedlichen Belastungsstufen) eine ausführliche Untersuchung bezüglich der vorliegenden Verteilungsfunktionen vorgenommen. Die Hauptausfallursache bei den hier zu Grunde liegenden Versuchen war Lamellenschluss, so dass sich die folgenden Aussagen im Wesentlichen auf dieses Fehlerbild beziehen. Der Vollständigkeit halber soll erwähnt werden, dass grundsätzlich auch andere Ausfallmechanismen wie z.B. Bürstenverschleiß oder Lagerschäden auftreten können. Durch geeignete Anpassungstests konnte nachgewiesen werden, dass das Ausfallverhalten der Probanden durch eine Weibullverteilung gut zu beschreiben ist. Da nur relativ wenige Beobachtungen pro Belastungslevel vorliegen kann nicht entschieden werden, ob anstatt einer gewöhnlichen Weibullverteilung mit 2 Parametern eine 3-parametrische Weibullverteilung vorliegt.

Die Hypothese, dass eine Exponential-Verteilung vorliegt, kann mit Hilfe eines Likelihood-Quotienten-Tests gegen eine Weibull-Verteilung ausgeschlossen werden. Die Annahme einer Normalverteilung ist in diesem Fall ebenfalls wenig sinnvoll, da bei einer Normalverteilung mit aus der Stichprobe geschätzten Parametern die Wahrscheinlichkeit negativer Ausfallzeiten nicht vernachlässigbar ist und sich somit keine vernünftige Beschreibung ergibt.

EINFLUSS DER BETRIEBSART

Die ersten Dauerläufe dienten zusätzlich zur Untersuchung des Einflusses der gewählten Betriebsart. Es wurden sowohl Motoren mit konstanter Drehrichtung als auch im Reversierbetrieb unter jeweils gleicher Last betrieben. Dabei hat sich gezeigt, dass die Belastung für das Kommutierungssystem im Dauerbetrieb mit konstanter Drehrichtung deutlich höher ist. Dies ist im Wesentlichen auf das schlechtere Schmierverhalten und die konstante Bürstenpolarität zurückzuführen (Tabelle 1).

Zudem hat sich gezeigt, dass der Drehzahleinfluss und damit der rein mechanische Verschleiß eine untergeordnete Rolle spielt (vgl. [3]). Das dominierende Kriterium für das Lebensdauer-Ende der Motoren ist der elektrische Verschleiß. Die Ergebnisse der ersten Versuche zeigen, dass die Minusbürste, die kaum einem elektrischen Verschleiß unterworfen ist, nahezu keinen Abrieb besitzt. Genauso haben Versuche mit deutlich höheren Drehzahlen bei ähnlichen Strömen keinerlei Unterschiede im Bürstenverschleiß gezeigt. Trifft dies zu, verbieten sich rein überrollungs- bzw. umdrehungszahlorientierte Verschleißbetrachtungen für diese Motoren insbesondere für die frühen Entwicklungsphasen, die gegenwärtig zumindest für eine erste Abschätzung häufig genutzt werden. Bei der Zerlegung der Prüflinge haben sich zwei Hauptursachen für das Lebensdauerende

herauskristallisiert, der Lamellenschluss und der Bürstenverschleiß. Der Lamellenschluss ist dadurch gekennzeichnet, dass sich zwischen den Kollektorlamellen Abrieb anlagert, der zu Kriechströmen zwischen den einzelnen Lamellen führen kann und im schlimmsten Fall einen Kurzschluss verursacht, der damit zum Ausfall des Motors führt (Abb. 8). Durch die lokale Überhitzung, bedingt durch den Kurzschlussstrom, kann es schließlich zu einer starken Deformation des Kollektors kommen.

Tabelle 1: Vergleich von kontinuierlichem mit reversierendem Betrieb

	Dauerbetrieb	Reversierbetrieb
Betriebsparameter	kontinuierlicher Betrieb (Rechtslauf)	Betrieb mit ständiger Richtungsumkehr (300s Betrieb/ 3s Pause/ Richtungsumkehr)
Bürstenverschleiß	+Bürste verschleißt sehr stark - Bürste ohne gravierende Verschleißspuren	+ und – Bürste werden gleichmäßig stark durch den Umpolvorgang abgenutzt
Kollektorverschleiß	Verschleiß unter 5%, teilweise sehr starke Rillenbildung erkennbar	Verschleiß unter 5%, vereinzelt etwas stärker glatt geschliffen, als beim Dauerbetrieb
Fettschmierung	Schmierung wird sehr schnell verbraucht und teilweise „weggeschleudert“	Schmierung bleibt länger erhalten, Position des Fettpropfes nahezu konstant
Lebensdauer	die Lebensdauer des Motors im Reversierbetrieb liegt deutlich über der erreichbaren beim Dauerbetrieb	
Erkenntnisse	<ul style="list-style-type: none"> • der Dauerbetrieb stellt die kritischere Belastung für den Motor dar • die Anodenbürste ist auf Grund des Energieflusses einer höheren Belastung ausgesetzt • der Kollektorverschleiß unterscheidet sich nur sehr geringfügig • das Verhalten des Fettpropfes ist im Dauerbetrieb ungünstiger • die Drehzahl spielt eine untergeordnete Rolle. Der elektrische Verschleiß ist dominant. 	<ul style="list-style-type: none"> • die ständigen Anfahr- und Abbremsvorgänge scheinen keinen entscheidenden Einfluss auf die Lebensdauer zu haben • die Gefahr des Lamellenschlusses scheint auch vom Entstehungsort des Abriebs abhängig zu sein bzw. • die Lage des Fettpropfes bleibt länger stabil und kann daher mehr Schmutz binden

Der Bürstenabrieb hingegen beschreibt den Verschleiß der einzelnen Bürstenfinger. Ist die gesamte Lauffläche der Bürste verschlissen, so dass die Lamellen auf dem Trägermaterial laufen bzw. bricht die Bürste, spricht man von Bürstenverschleiß. Bei den bisher untersuchten Motoren wurden die Ausfälle überwiegend durch Lamellenschluss hervorgerufen.

Der Einfluss der Belastungshöhe auf die Motorlebensdauer im Dauerbetrieb konnte ermittelt werden. Dabei entspricht eine Belastungshöhe von 100% dem Nennmoment des Antriebs. Da den Versuchen identische Motoren zu Grunde lagen, ist die einzige Einflussgröße die Belastung und damit der Kommutierungsstrom bzw. die Stromdichte am Übergang von Bürste zur Kollektorlamelle. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit abnehmender Belastung die Lebensdauer steigt, was auf den geringeren elektrischen Verschleiß zurückzuführen ist. Mit steigender Belastungshöhe werden dagegen die Unterschiede geringer.

Überraschenderweise lassen die ersten Daten darauf schließen, dass gewisse Belastungsbereiche mit ähnlichen Lebensdauererwartungen vorliegen und darüber hinaus dann ein Sprungverhalten beobachtet werden kann [7].

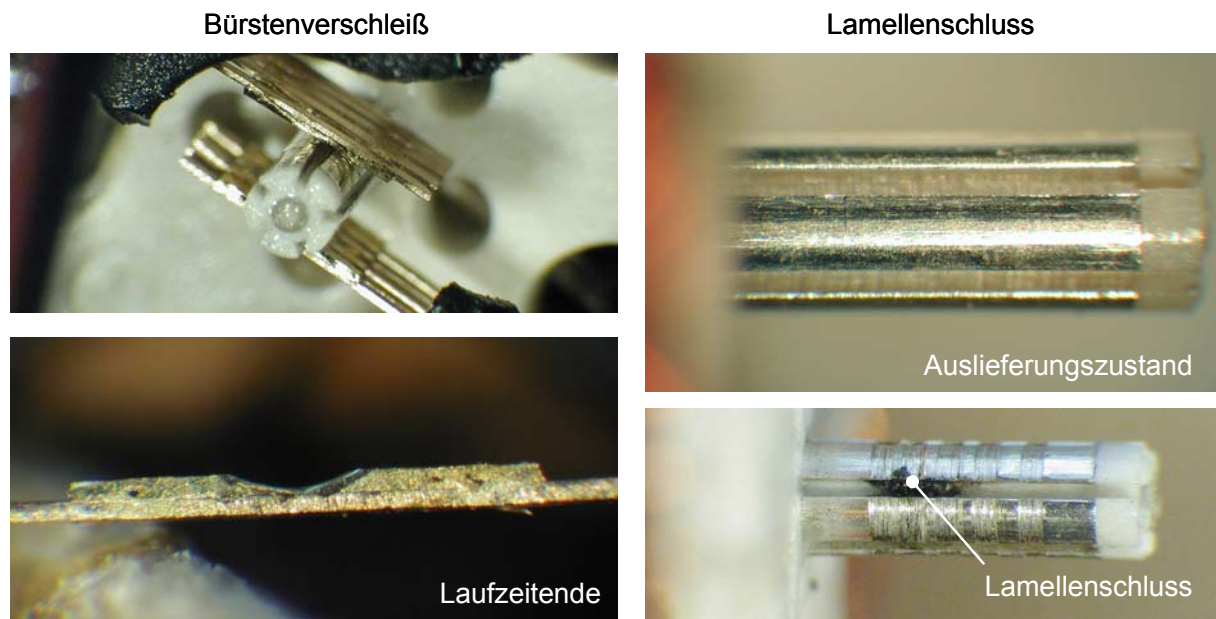


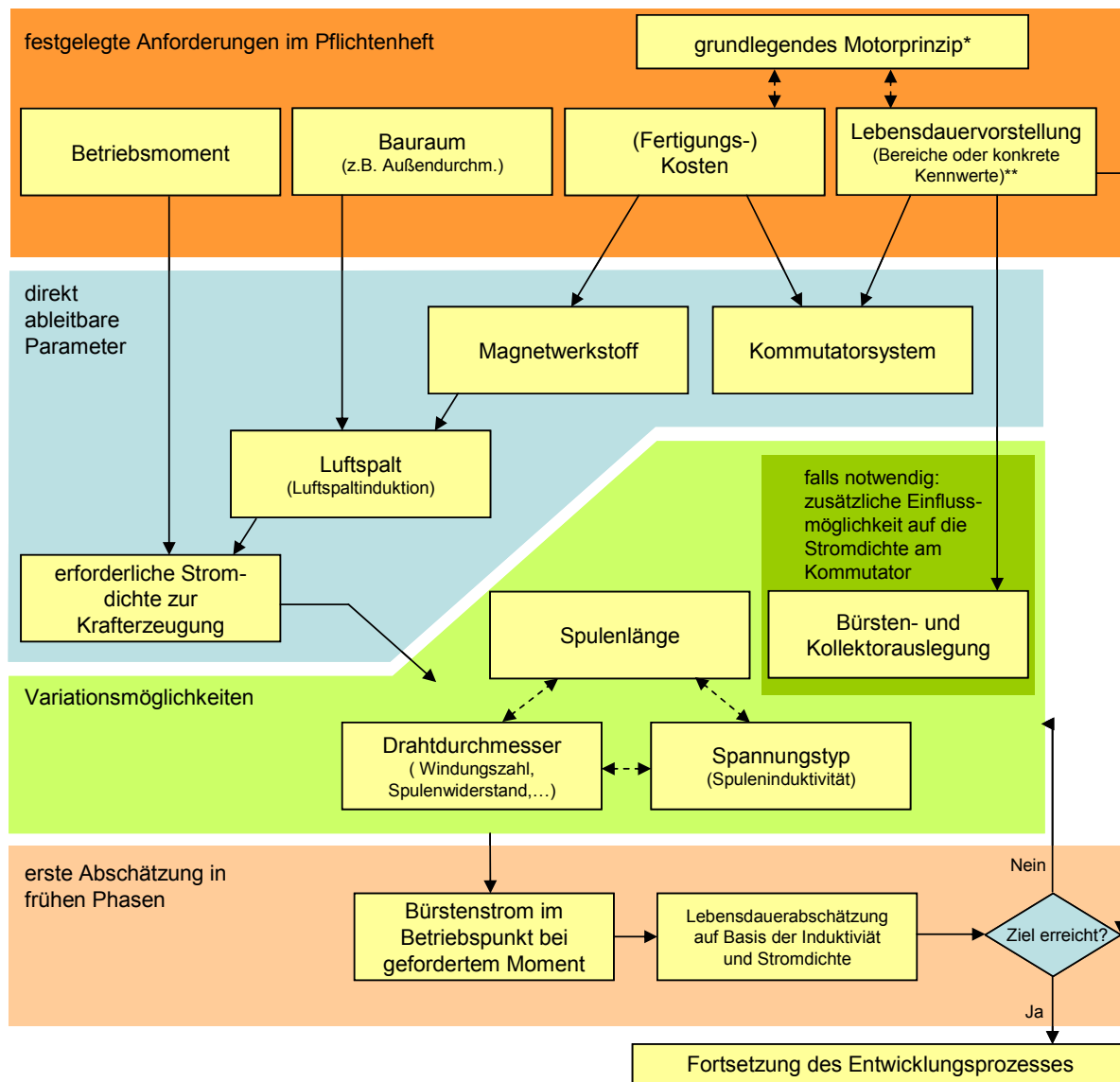
Abb. 8: Ausfallursachen des elektromechanischen Teilsystems

Der Kommutierungsstrom stellt dabei eine sehr interessante Kenngröße dar, da er bei der Spulenauslegung sehr früh festgelegt wird und somit ganz zu Beginn des Entwicklungsprozesses in frühen Phasen angesiedelt ist. Die vorliegenden Verteilungen liefern erste Ansätze die zur Berechnung der Zuverlässigkeit notwendig sind. Die Werte auf der Abszisse wurden aus Datenschutzgründen nicht dargestellt.

ÜBERTRAGUNG DER BISHERIGEN ERKENNTNISSE AUF FRÜHE PHASEN

Die Zurücksetzung in frühe Entwicklungsphasen erfolgt anhand des V-Modells, wie es in der VDI-Richtlinie 2206 [8] für die Produktentwicklung mechatronischer Systeme beschrieben wird. Bevor die Übertragung auf allgemeine Systeme dargestellt wird, ist zunächst die Vorgehensweise zur Übertragung der Erkenntnisse in frühe Phasen anhand des Entwicklungsprozess eines Kleinstmotors beispielhaft erläutert (Abb. 9). In den meisten Fällen handelt es sich um Entwicklungen, bei denen auf Kenntnisse von Vorgängererzeugnissen zurückgegriffen werden kann. Bei kompletten Neuentwicklungen mit überwiegend unbekannten Technologien ist eine Beurteilung der Zuverlässigkeit im frühen Stadium dagegen nahezu unmöglich, es können dann meist nur noch vergleichende Betrachtungen unterschiedlicher Lösungen und Technologien eingesetzt werden.

Den Ausgangspunkt der Betrachtung stellt das Pflichtenheft eines Motors dar, in dem definiert ist, welche Informationen zu Beginn der Entwicklung zur Verfügung stehen. Im Fall der Motorentwicklung sind dabei meistens der Bauraum (Außendurchmesser), die geforderten Motorkennwerte, die Kosten und auch konkrete Lebensdauervorgaben bekannt. Hierbei hat auch die Betrachtung verschiedener Pflichtenhefte die Erkenntnisse der Recherche bestätigt, dass eine sehr große Unsicherheit im Umgang mit den Lebensdauerdaten zu verzeichnen ist.



* durch Vorkenntnisse ist sehr schnell klar, mit welchem Grundprinzip die geforderten Wünsche (Kosten, Lebensdauer,...) überhaupt realisierbar sind. Die Entscheidung für ein Motorprinzip ist als Basisinformation anzusehen und die im Pflichtenheft angegebenen Forderungen sollten bereits darauf abgestimmt sein.

** oftmals werden weite Bereiche oder Kombinationen aus Kennwerten angegeben (z.B. Vorgabe vom Kunden durch Schnittstellensysteme). Durch die im Projekt ermittelten Verteilungsfunktionen kann sehr schnell abgeschätzt werden, mit welchem elektromechanischen System ein solcher Verlauf überhaupt erreicht werden kann, bzw. welche der angegebenen Kennwerte bestimmend für die Entwicklung sind. Dadurch können sehr früh nicht zielführende Ansätze erkannt und ausgeschlossen werden.

Abb. 9: Beispielhaftes Konzept für den Einsatz der gewonnenen Erkenntnisse in frühen Phasen

Die festgeschriebenen Anforderungen (auch Kundenforderungen) reichen von sehr weiten Lebensdauerbereichen bis hin zu konkreten mittleren Ausfallzeiten, wobei diese oftmals mit Mindestlebensdauern gekoppelt sind. Da bisher die Verteilungsfunktionen nicht bekannt sind, ist eine Auslegung gezielt auf diese Werte unmöglich. Darin verbirgt sich einer der Ansatzpunkte der durchgeführten Untersuchungen. Durch die Ermittlung der vorliegenden Verteilungsfunktionen und der dazugehörigen Parameter kann sehr schnell abgeschätzt werden, in welchem Bereich die Auslegung erfolgen muss, da nicht beliebige Kombinationen einzelner Kennwerte erreichbar sind. Alternativ dazu kann auch von Beginn an der dominierende Kennwert herausgefiltert und die Auslegung dementsprechend ausgerichtet werden.

Bei den gegebenen Randbedingungen ist einer der ersten Schritte, die theoretische Auslegung des Spulensystems. Die Variationsmöglichkeiten beim Magnetmaterial und dadurch auch die Luftspaltinduktion sind nach Festlegung des Kostenrahmens und der globalen Zielstellung nur noch relativ gering. Somit bleibt lediglich die Spulendimensionierung, die hauptsächlich durch die benötigte Stromdichte bestimmt wird, als Variable. Durch geeignete Wahl der Drahtdicke, der Spulenlänge und des Spannungstyps ergibt sich daraus der tatsächlich auftretende Kommutierungsstrom. Der Einfluss des Stroms und des Spannungspotentials auf die Lebensdauer fallen als Nebenprodukt der Untersuchungen in diesem Teilprojekt an. So ist zumindest tendenziell eine Aussage über den Zusammenhang von Belastungshöhe (Kommutierungsstrom), Spuleninduktivität und Lebensdauer möglich. Damit kann sofort eine Abschätzung der Zuverlässigkeit eines Motors erfolgen, bevor die erste Spule gewickelt wird. Die Idee, die dahinter steht, ist es, die Spulenparameter in einen solchen Bereich zu bewegen (Anpassung der Länge, Spannungstyp, usw.), dass aus Sicht der Zuverlässigkeit und unter Einhaltung der anderen Randbedingungen ein Optimum erreicht wird. Inwieweit konkrete Zahlenwerte am Ende der ersten Projektphase stehen werden, ist noch ungewiss. Es ist jedoch sicher, dass eine Entscheidung zwischen zwei Auslegungen bezüglich ihrer zu erwartenden Lebensdauer getroffen werden kann. Ein weiterer Ansatzpunkt liegt darin, durch die Wahl des späteren Arbeitspunktes, basierend auf den gewonnen Erfahrungen, in gewissem Maße die Ausfallsteilheit beeinflussen zu können.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ausgehend von einer ausführlichen Marktrecherche wurde der aktuelle Stand der Forschung im Bereich der Zuverlässigkeit auf dem Sektor von Kleinantrieben erläutert. Auf Grund der heterogenen Ausgangssituation wurden umfangreiche Dauerversuchsstände entwickelt und aufgebaut. Durch erste Versuche konnten die typischen Ausfallursachen ermittelt werden. Zudem hat sich die An-

wendung der Weibull-Verteilung zur Beschreibung des Ausfallverhaltens der Motoren als geeignet erwiesen. Der teilweise verwendete Ansatz einer Exponentialverteilung konnte explizit ausgeschlossen werden. Erste mathematische Modelle wurden abgeleitet und ein Konzeptvorschlag unter Verwendung dieser Ergebnisse zur Zuverlässigkeitsbestimmung in frühen Entwicklungsphasen ist entstanden. Die Versuchsreihen werden derzeit weitergeführt und auf andere Baureihen und Hersteller ausgeweitet, um die gewonnenen Erkenntnisse abzusichern.

Die Untersuchungen an Antrieben bilden hierbei nur einen Einstieg. Das Ziel besteht insgesamt darin, Positioniereinheiten und komplette mechatronische Systeme entsprechend beschreiben zu können. Dabei umfassen die Gesamtuntersuchungen der Forschergruppe neben den feinmechanischen Elementen auch klassische Mechanik, Software und Elektronik-Hardware-Komponenten. Am Gesamtprojekt sind mehrere Institute beteiligt, um durch sinnvolle Nutzung der Synergien diesen großen Bereich kompetent abdecken zu können.

Literatur- bzw. Quellenhinweise:

- [1] Meyna, A.: Experimentelle und theoretische Untersuchung der technischen Zuverlässigkeit von Elektromotoren. Dissertation, TU Berlin, 1976.
- [2] Volkmann, W.: Kohlebürsten, Untersuchungsergebnisse, Erfahrungen, Empfehlungen. Schunk & Ede GmbH, Gießen, 1980.
- [3] Halmai, A.; Huba, A.: Die Vorteile der Axial-Magnetfeld Gleichstrom-Kleinstmotoren. IWK 43, TU Ilmenau, 1998. Band IV. Vortragsreihen S. 511-516.
- [4] Ermolin, Zerichin: Zuverlässigkeit elektrischer Maschinen, VEB Verlag, 1976(82).
- [5] T. Köder, W. Schinköthe: Untersuchungen zur Zuverlässigkeit von DC-Kleinstmotoren, Veröffentlichung zum Workshop „System- Zuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen, Freudenstadt, 2004.
- [6] Köder, T.; Schinköthe, W.: Aussagen zur Lebensdauer von Kleinstantrieben. Festbroschüre, Universität Ilmenau, 2005.
- [7] Gandy, A.; Jensen, U.; Köder, T.; Schinköthe, W.: Ausfallverhalten bürstenbehafteter Kleinstantriebe – Prüfstandsversuche und deren statistische Analyse. Mechatronik F&M, Heft 8-9, 2005. (eingereicht)
- [8] VDI-Richtlinie 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Produkte

Autorenangaben:

Dipl.-Ing. Thilo Köder

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe

Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik (IKFF), Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart

Tel.: 0711/685-6402

Fax: 0711/685-6356

E-mail: zuverlaessigkeit@ikff.uni-stuttgart.de